

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 539.1.075

МОДУЛЬ 48-КАНАЛЬНОГО ЗАРЯДОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ КАЛОРИМЕТРОВ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

© 2019 г. М. М. Солдатов^{а,*}, В. А. Сенько^а

^а Институт физики высоких энергий имени А.А. Логонова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”
Россия, 142281, Протвино Московской обл., пл. Науки, 1

*e-mail: Mikhail.Soldatov@ihep.ru

Поступила в редакцию 20.09.2018 г.

После доработки 18.10.2018 г.

Принята к публикации 01.11.2018 г.

Представлены описание и основные технические характеристики модуля системы регистрирующей электроники “ЕвроМИСС” — быстродействующего стробируемого зарядочувствительного аналого-цифрового 48-канального преобразователя, предназначенного для построения электронных систем регистрации с многоканальными детекторами в физике высоких энергий. Максимальный измеряемый заряд составляет 1000 пКл или 330 пКл, динамический диапазон — 12 двоичных разрядов, время преобразования — 1.3 мкс, интегральная нелинейность преобразования — 0.05%.

DOI: 10.1134/S0032816219030108

ВВЕДЕНИЕ

Современные эксперименты в физике высоких энергий ориентированы на поиск редких событий, и это обстоятельство обуславливает основное требование к регистрирующей электронике — обеспечение высокой производительности систем регистрации. Решение этой задачи достигается использованием наиболее развитых устройств для выработки запускающего (триггерного) сигнала, осуществляющих максимальное подавление фоновых событий и уменьшение “мертвого времени” собственно регистрирующих приборов. “Мертвое время” — это суммарное время преобразования принятой от детектора информации в цифровую форму и время передачи преобразованных данных в устройство внешней буферной памяти — память контроллера.

В процессе регистрации физических событий в многоканальных калориметрах физики высоких энергий (и не только калориметрах) образуется некоторое число слов, равное количеству каналов регистрации. Эти слова содержат данные о зарегистрированном электрическом заряде в отдельном канале регистрации и адресе этого канала. Однако в массиве из этих слов до 90% и более содержится информация о “пьедесталах” и только, так как регистрируемые частицы при каждом триггере (запуске регистрирующей электроники, соответствующем приходу кандидата на интересное взаимодействие) “засвечивают” лишь

малую часть всей апертуры установки. Под “пьедесталом” следует понимать цифровой код, получаемый от не “засвеченного” канала регистрации. Эти цифровые коды имеют различные адреса для каждого триггера и случайным образом рассеяны в принимаемом массиве данных.

В процессе регистрации данные о “пьедесталах” являются нулевой информацией, т.е. не содержащей какой-либо смысловой информации. Так как время при выводе пучка ускоренных протонов из ускорителя весьма дорого, не имеет смысла тратить его на передачу нулевой информации в э.в.м., в противном случае ее пришлось бы все равно отбрасывать при off-line-обработке. Следует заметить, что информация о “пьедесталах” имеет большое значение при настройках системы, контроле стабильности и работоспособности вообще (здесь это уже не нулевая информация), но все это осуществляется вне времени вывода пучка.

Система МИСС [1], разработанная в ИФВЭ, обеспечивает считывание рассеянных данных из каркаса с электроникой и высокую скорость передачи. С целью повышения эксплуатационных характеристик в ИФВЭ была создана новая система для построения регистрирующей электроники “ЕвроМИСС” [2]. Для работы в составе электроники регистрации и сбора данных с экспериментальных установок ИФВЭ продолжительное время использовались зарядочувстви-

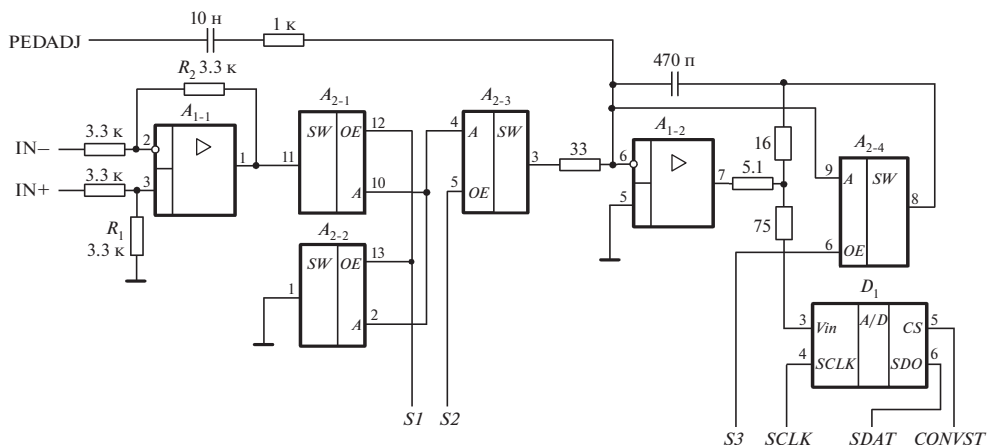


Рис. 1. Принципиальная схема одного канала преобразования. A_1 – AD8056, A_2 – MAX4616, D_1 – ADS7886.

тельные аналого-цифровые преобразователи (з.а.ц.п.) [3], однако с развитием микроэлектроники появилась возможность разработки более совершенных измерительных приборов этого класса. В данной работе описан модуль системы “ЕвроМИСС” – 48-канальный з.а.ц.п., предназначенный для построения быстродействующих систем регистрации информации от калориметров физики высоких энергий [4].

48-КАНАЛЬНЫЙ З.А.Ц.П. (ЕМ-6)

Основными задачами при разработке модуля были: уменьшение времени преобразования; обеспечение высоких метрологических характеристик (линейность характеристики, динамический диапазон, стабильность); максимальная плотность размещения; малая мощность потребления и возможность использования стандартных номиналов питающих напряжений; возможность приема положительных, отрицательных и дифференциальных сигналов с высокими скоростями нарастания и спада; возможность работы с различными источниками сигналов (электронные усилители газовых калориметров, фотоэлектронных умножителей (ф.э.у.)), т.е. возможность согласования входного сопротивления канала регистрации з.а.ц.п. с различными линиями передачи (коаксиальный кабель, скрученная пара и пр.); помехоустойчивость; ремонтпригодность.

Модуль ЕМ-6 представляет собой 48-канальный з.а.ц.п. с выделением значащей (отбрасыванием ненужной) информации и промежуточным хранением данных до передачи их в буферную память контроллера “ЕвроМИСС”. Конструктивно ЕМ-6 состоит из материнской платы и 24 мезонинных плат QDC2, устанавливаемых в 24 разъема SIMM30, расположенных на материнской плате.

Мезонинная плата QDC2

На мезонинной печатной плате смонтированы 2 канала преобразования величины электрического заряда, зарегистрированного в течение времени строба, в цифровой 12-разрядный двоичный код. Принципиальная схема одного канала преобразования, представленная на рис. 1, содержит входной буферный усилитель с дифференциальным входом A_{1-1} (AD8056, Analog Devices), параллельно-последовательное устройство линейного пропускания A_{2-1} – A_{2-3} (MAX4616, MAXIM Inc.),

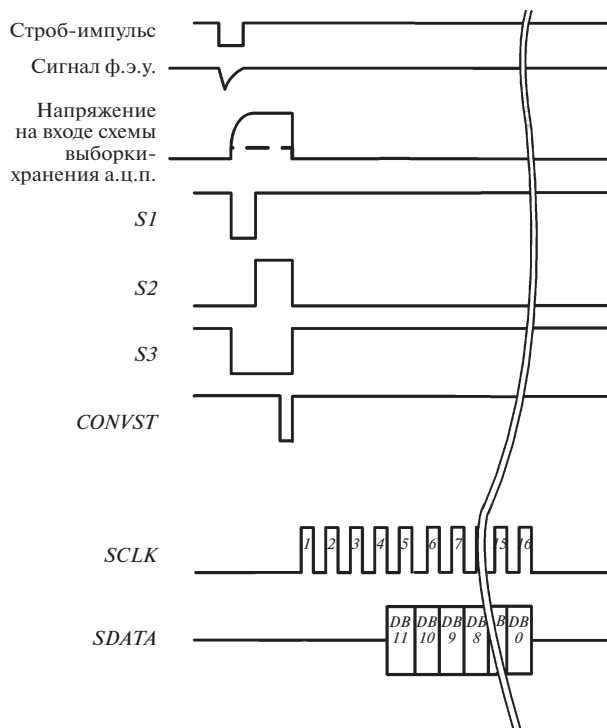


Рис. 2. Временная диаграмма работы канала QDC2.

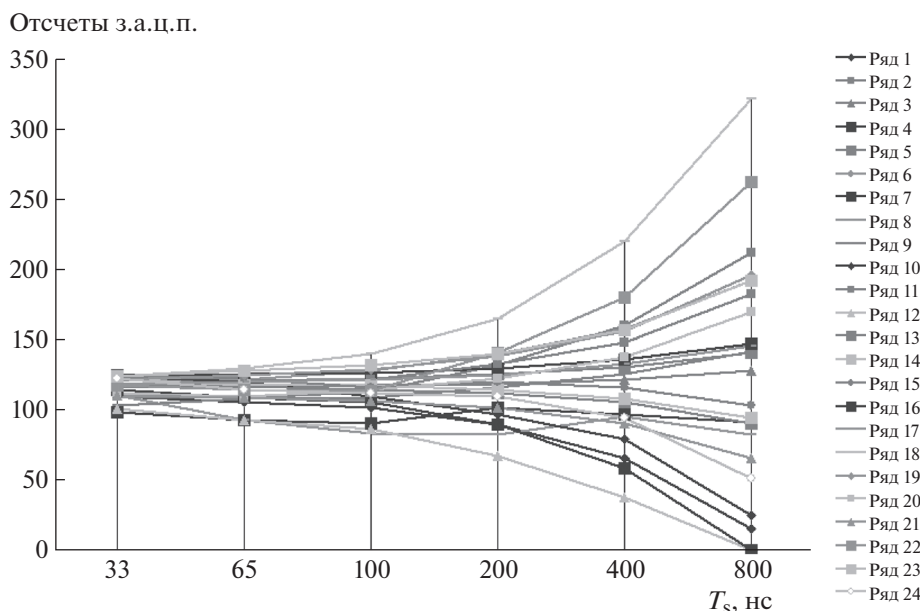


Рис. 3. Типичный вид зависимостей величины “пьедесталов” от ширины строб-импульса T_s .

управляемый интегратор A_{1-2} , A_{2-4} и аналого-цифровой преобразователь D_1 (а.ц.п. ADS7886, Texas Instruments.). Использование операционных усилителей в буферном усилителе и интеграторе обеспечивает высокую устойчивость к синфазным помехам в линии передачи от детектора, помехам и нестабильностям в цепях питания, слабую температурную зависимость параметров.

Интегральная схема а.ц.п. — 12-разрядный преобразователь с временем преобразования 1 мкс с одновременным преобразованием и вычитыванием данных. Для управления параллельно-последовательной схемой линейного пропускания и интегратором используются три строб-сигнала $S1-S3$, а для управления интегральной схемой а.ц.п. предназначены управляющие сигналы $CONVST$ и $SCLK$, которые являются общими для всех каналов модуля. $SDAT$ — вывод данных последовательным кодом — индивидуальный сигнал с каждого канала преобразования. На вывод $PEDADJ$ подаются импульсные сигналы отрицательной полярности для обеспечения “пьедестала”. Для согласования уровней сигналов в схеме номиналы питающих напряжений микросхемы A_2 изменены до +3 В вместо +5 В и –2 В вместо 0 В.

На рис. 2 приведены временные диаграммы работы канала QDC2. Горизонтальной штриховой линией обозначен уровень напряжения на входе схемы выборки-хранения а.ц.п. при отсутствии сигнала от ф.э.у. — напряжение “пьедестала”.

Основные параметры канала преобразования платы QDC2:

— интегральная нелинейность $<0.05\%$ при скорости нарастания входного сигнала ≤ 10 мА/нс и входном сопротивлении 50 Ом;

— дифференциальная нелинейность ± 0.5 м.з.р., определяется примененной микросхемой а.ц.п. ADS7886;

— время преобразования-вычитывания ~ 1.3 мкс;

— стабильность — изменение величины “пьедестала” за сутки при изменении температуры окружающей среды на 15°C не превышает 0.3 м.з.р.;

— динамический диапазон 12 бит;

— полярность входных сигналов — положительная, отрицательная, дифференциальные сигналы;

— входное сопротивление канала QDC2 — 1 кОм;

— диапазон длительностей строб-импульса — 20–150 нс. (см. рис. 3, где приведены примерные зависимости величины “пьедесталов” от ширины сигнала $Строб$, Ряд 1, Ряд 2 и т.д. соответствуют 24 каналам преобразования, расположенным в модуле);

— максимальный измеряемый заряд при $R_{вх} = 50$ Ом — 330 пКл (1000 пКл) [плата может иметь различные значения чувствительности, задаются номиналами резисторов R_1 , R_2 (рис. 1) при производстве];

— скорость изменения входного сигнала при $R_{вх} = 50$ Ом до 10 мА/нс без ухудшения параметров;

— число каналов — 2;

— потребляемая мощность: +5 В $\times$ 15 мА/канал, –5 В $\times$ 10 мА/канал, +3 В $\times$ 1 мкА/канал, –2 В $\times$ 1 мкА/канал;

— размеры печатной платы QDC2 — 13 $\times$ 89 мм.

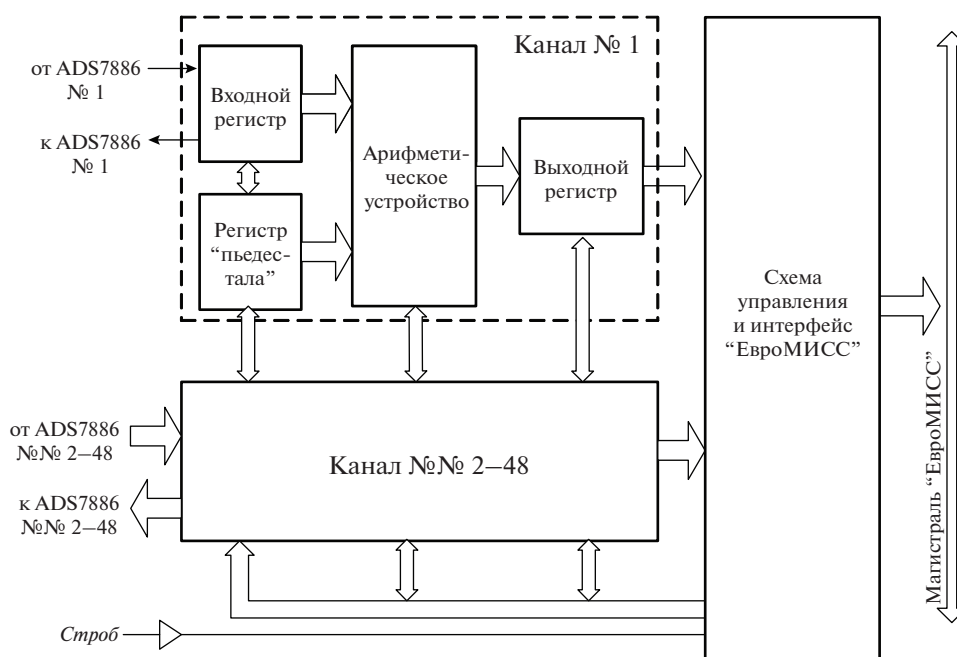


Рис. 4. Структурная схема цифровой части модуля ЕМ-6.

Цифровая часть модуля ЕМ-6

Для достижения малого “мертвого” времени цифровая часть модуля ЕМ-6 имеет следующие особенности:

- запись в выходные регистры памяти и последующую передачу в контроллер сектора “ЕвроМИСС” только значащей информации;
- аналого-цифровое преобразование в а.ц.п. и передача данных в устройства обработки совмещены во времени и происходят параллельно во всех 48 каналах за 1.3 мкс;
- для обработки-вычитания “пьедесталов” предназначено 48 параллельно работающих устройств, при этом вычитание “пьедесталов” осуществляется одновременно для всех каналов за 50 нс.

На рис. 4 приведена структурная схема цифровой части модуля ЕМ-6. Цифровая часть модуля включает в себя 48 входных регистров сдвига, принимающих участие в процессе аналого-цифрового преобразования совместно с а.ц.п. ADS7886, 48 регистров для хранения “пьедесталов” и 48 выходных регистров для промежуточного хранения результатов, а также схему управления с интерфейсом к магистрали “ЕвроМИСС”. На коаксиальный разъем передней панели поступает сигнал *Строб*, длительность которого определяет время интегрирования входных сигналов от детектора. При отсутствии сигнала *Строб* входные сигналы игнорируются.

Схема управления и интерфейса к магистрали “ЕвроМИСС” предназначена для управления временной селекцией сигналов, интегрированием,

аналого-цифровым преобразованием, передачей данных из мезонинных плат QDC2, обработкой и занесением обработанных данных во внутреннюю буферную память модуля, а также реализации протоколов “ЕвроМИСС”. Кроме того, она обеспечивает возможность записи в запоминающее устройство для “пьедесталов” и чтения его, запись и чтение данных в сдвиговые регистры для организации режима тестирования системы сбора, организацию тестовых режимов работы.

Для каждого события (взаимодействия частиц в детекторе), отобранного триггерным устройством, вырабатывается сигнал *Строб*. Обработка информации состоит в вычитании из значений данных, получаемых от каналов преобразования, соответствующих “пьедесталов”, и, если результат операции положителен, он заносится в регистры промежуточной памяти вместе с соответствующим адресом — номером канала. В противном случае данные отбрасываются. Такой механизм обработки позволяет резко сократить объем передаваемой информации в магистраль “ЕвроМИСС”, что приводит к уменьшению “мертвого времени” системы регистрации и, соответственно, экономии дорогого ускорительного времени. Сокращению “мертвого времени” способствует также использование 48 устройств обработки, работающих параллельно. Полное время обработки составляет примерно 50 нс.

Электрическая схема модуля практически полностью реализована в конфигурируемой микросхеме (FPGA Altera Cyclon II EP2C5QC208C8). Проект для FPGA разработан с использованием

Таблица 1. Сравнительные характеристики модулей EM-6 и V792(CAEN)

Характеристики	EM-6	V792
Механический конструктив	“Евромеханика 6U”	“Евромеханика 6U”
Стандарт электроники	“ЕвроМИСС”	VME
Число каналов	48	32
Входные сигналы	Положительные, отрицательные, дифференциальные	Отрицательные
Диапазон входных сигналов	330 пКл (1000 пКл)	400 пКл
Разрешение	12 бит	12 бит
Интегральная нелинейность	0.05%	0.1% в диапазоне 5–95% от полной шкалы
Время преобразования	1.3 мкс для всех каналов	5.7 мкс для всех каналов
Подавление незначущей информации	Индивидуально, в каждом канале	Устанавливаются пороги с шагом 2 отсчета в диапазоне 1/8 от полной шкалы
Вычитывание только значащей информации, обеспечиваемое электронным протоколом ЕвроМИСС/VME	Есть	Нет
Номиналы питающих напряжений	± 5 В	± 5 В, ± 12 В

программной системы QUARTUS II, версии 9.1 SP1 и содержит 3685 логических ячеек. Исключение составляют микросхемы для преобразования логических уровней и микросхемы приемников-передатчиков.

В модуле предусмотрена развитая система диагностики, которая позволяет проверять работу всех узлов (входных и выходных регистров, вычитающих устройств и т.д.), качество монтажа и имитировать основной режим работы при отсутствии входных сигналов. В табл. 1 показано сравнение основных характеристик модуля EM-6 и модуля стандарта VME [5] фирмы CAEN V792 [6].

Потребление мощности модулем EM-6: $+5$ В $\times$ 0.8 А, -5 В $\times$ 0.5 А.

В настоящее время модули работают в составе различных экспериментальных установок ИФВЭ ОКА [7], СПАСЧАРМ [8] и др. Общее количество используемых каналов з.а.ц.п., построенных на основе модуля EM-6, около 3 тысяч.

В заключение выражаем искреннюю благодарность А.П. Филину и П.А. Семёнову за ряд ценных замечаний при включении EM-6 в экспериментальные установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бушин Ю.Б., Ваньев В.С., Гончаров П.И., Зимин С.А., Исаев А.Н., Коноплянников А.К., Марчихин Н.К., Медовиков В.А., Макаров Г.П., Разумов А.А., Сенько В.А., Солдатов М.М., Шаланда Н.А., Якимчук В.И. Препринт ИФВЭ 88-47. Серпухов, 1988.
2. Букреева С.И., Емельянов Н.М., Исаев А.Н., Карпеков Ю.Д., Киселев Ю.С., Петров В.С., Сенько В.А., Солдатов М.М., Шаланда Н.А., Якимчук В.И. // ПТЭ. 2014. № 6. С. 23. doi 10.7868/S003281621405005X
3. Сенько В.А., Солдатов М.М., Якимчук В.И. Препринт ИФВЭ 2012-19. Протвино, 2012.
4. Солдатов М.М., Сенько В.А. Препринт ИФВЭ 2018-9. Протвино, 2018.
5. VMEbus SPECIFICATIN MANUAL conform to: ANSI/IEEE STD 1014-1987 IEC 821 and 297. VMEbus International Trade Association 10299 N.Scottsdale Rd, Suite E, Scottsdale, AZ 82253 USA.
6. www.caen.it (сайт фирмы CAEN).
7. Донсков С.В., Инякин А.В., Карпеков Ю.Д., Матвеев В.Д., Образцов В.Ф., Сенько В.А., Солдатов М.М., Филин А.П., Шаланда Н.А., Якимчук В.И., Макаров А.И., Худяков А.А. // ПТЭ. 2016. № 4. С. 38. doi 10.7868/S0032816216040042
8. Букреева С.И., Васильев А.Н., Гончаренко Ю.М., Деревщиков А.А., Маслова Е.В., Мельник Ю.М., Мещанин А.П., Мочалов В.В., Рыжиков С.В., Рязанцев А.В., Семенов П.А., Сенько В.А., Шаланда Н.А. Препринт ИФВЭ 2018-6. Протвино, 2018.